

井下移动热源对深部巷道风流环境影响研究

郭良银¹, 张建俊², 王 宇²

(1. 山东黄金矿业股份有限公司新城金矿; 2. 辽宁工程技术大学土木工程学院)

摘要:为探究深部巷道内移动热源对巷道风流环境的影响,以新城金矿为工程背景,对深部某中段运输巷道进行风温风速监测,通过现场调研和理论公式计算新城金矿深部巷道燃油设备放热量,基于 Fluent 有限元软件,模拟不同风流情况下移动热源的动态响应,分析移动热源对深部巷道风流环境的影响。结果表明:监测段巷道平均风速为 1.91 m/s,平均风温为 33.38 °C;热源在顺风移动时对前端和尾部风温均产生影响,风温随距离增加逐渐减小,在热源前端 15 m 处趋于稳定,稳定风温为 33.75 °C,并在热源尾部 2 m 范围内持续产生高温;热源逆风移动时仅对尾部风温产生影响,风温在热源尾部 0~20 m 逐渐变小,并在热源尾部 20 m 处趋于稳定,稳定风温为 34.12 °C;热源逆风移动时对风流的影响范围比顺风移动时大,逆风移动时风温比顺风移动时高 0.37 °C。

关键词:深部巷道;机械化;移动热源;风流环境;数值模拟

中图分类号:TD727

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2024)02-0008-06

doi:10.11792/hj20240202

引言

随着浅部资源不断枯竭,深部开采成为矿山企业发展新趋势,随着矿山开采深度不断增加,高温热害问题特别突出。矿井热害形成的主要原因可以归纳为:井巷围岩放热、风流自压缩放热、机电设备放热^[1]。随着科技发展,矿山机械化程度不断提高,机电设备等移动热源放热已成为深部矿井高温热害问题的重中之重。

近几年,国内外学者对井下热源进行了大量研究。吴柯杉^[2]通过相似试验的数据结果,验证了井下移动热源数值模拟的正确性;李宗翔等^[3]给出有热源通风巷道风流初始温度均匀分布与非均匀分布的定解条件;鹿广利等^[4]通过数值模拟得出移动热源在巷道 25~30 m 对热环境均有影响;赵宏斌^[5]分析了不同热源分布位置对采空区内部温度场分布规律及回风侧漏风温度的影响规律;张育玮等^[6]对巷道进行热阻计算,对比嵌入热阻前后的计算结果,得出由热源散热产生的热阻力对巷道风流的影响;ARTEM 等^[7]解决了分布式热源情况下矿井空气和岩体的耦合传热问题;CHRISTOPHE 等^[8]运用数值模拟软件 Open FOAM 模拟出矿工在工作时的热量和 CO₂ 生产量;LIANG 等^[9]模拟了地下 T 形隧道火灾,分析 T 形隧道天花板温度随火源功率的变化;徐加超等^[10]利用 ABAQUS 模拟中空环形热源移动时的温

度场分布及热循环曲线;王琮^[11]针对高斯移动热源的奇异性,提出了移动加权最小二乘无网格法;刘支会^[12]数值模拟了二维移动热源的热传导现象;黄山果等^[13]提出了热贡献率概念,得出了不同季节的热源放热曲线;屈永良等^[14]分析了不同热源对局部通风系统造成的影响。

综上所述,国内外学者对井下固定热源开展了大量研究,但对移动热源的研究较少。本文以山东黄金矿业股份有限公司新城金矿(下称“新城金矿”)为背景,对新城金矿深部某中段运输巷道进行了风温风速监测,并运用 Fluent 有限元软件的动网格技术开展了移动热源在巷道内的动态模拟,分析了新城金矿深部巷道移动热源对巷道风流环境的影响,数值计算结果更加符合工程实际。

1 工程概况

新城金矿位于山东省烟台市莱州市金城镇,隶属于山东黄金矿业股份有限公司,是一座大型地下开采黄金矿山。矿区属丘陵与滨海平原过渡地带,地势东南高,西北低,总体向西北倾斜。

随着矿产资源需求量不断提高,深部开采成为矿山发展趋势;随着现代科技不断进步,井下机械化作业也越来越多。矿山开采深度和机械化程度的不断增加与提高,导致巷道内温度也随之升高。高温工作环境严重危害工人身体健康,危及生产安全,甚至使

采矿工作被迫停止。目前,新城金矿深部运输巷道主要移动热源为:3 m³ 铲运机、1 m³ 铲运机、20 t 卡车、4 t 卡车、多功能服务车等,具体情况见表 1。

表 1 新城金矿深部运输巷道主要移动热源

Table 1 The main moving heat source in the deep transport roadway of Xincheng Gold Mine

设备名称	设备型号	数量	运行时间/(h·班 ⁻¹)
3 m ³ 铲运机	ST-2A	2	8
1 m ³ 铲运机	LH307	3	8
20 t 卡车	MT2010	1	8
4 t 卡车	EJC417	1	8
多功能服务车	JY-5	2	8

2 深部巷道风温风速监测及机电设备放热

2.1 深部巷道风温风速监测

选定新城金矿深部某中段运输巷道进行风温风速监测,共设置 9 个监测断面,相邻两个监测断面间距为 10 m。每个监测断面设置 2 个测点,两个测点间距为 2 m,测点高度为 1.5 m,每个测点测试时间为

1 min,具体布设情况见图 1。监测仪器选用 VS210 固体分体插入式风速仪,该仪器结构形式灵活多样、精度高、耐高温,适用于恶劣工况。

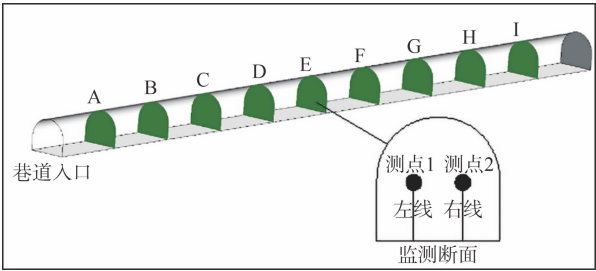


图 1 监测断面布设情况
Fig. 1 Monitoring section layout

风流变化曲线见图 2。由图 2-a) 可知:两条测线风速变化规律无明显差异,随着巷道距离的增加,巷道内的风速呈下降趋势,监测段巷道的风速基本稳定在 1.87 ~ 1.95 m/s,平均值为 1.91 m/s。由图 2-b) 可知:两条测线的风温变化规律相同,随着机电设备和围岩散热,巷道内风温呈小范围上升,监测段巷道的风温基本稳定在 33.23 °C ~ 33.47 °C,平均值为 33.38 °C。

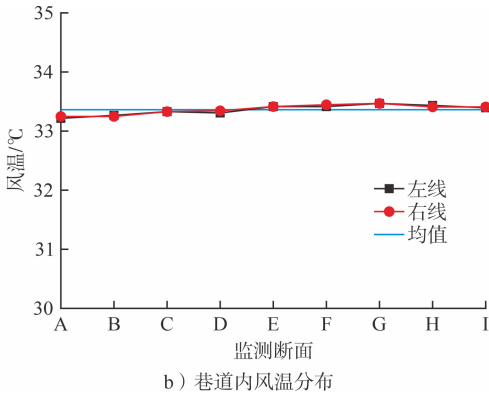
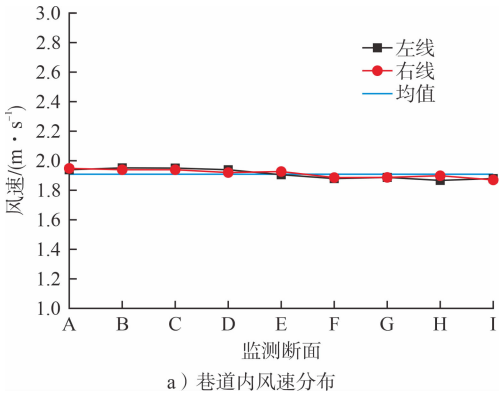


图 2 巷道内风流变化曲线

Fig. 2 Curve of wind flow variation in the roadway

2.2 机电设备放热

新城金矿深部巷道机电设备可分为电气设备和燃油设备,不同机电设备放热形式也不同。新城金矿主要燃油设备的放热形式是发动机散热和尾气的排放。燃油设备散热量可按式(1)、式(2)进行计算:

$$Q = (1 - \varphi)p_e \tag{1}$$

$$Q_s = 3\,600Q \tag{2}$$

式中: Q 为燃油设备的运行散热功率(kW); φ 为设备工作效率(%); p_e 为设备额定功率(kW); Q_s 为设备的散热量(J/h)。

根据新城金矿深部巷道燃油设备的功率来计算各燃油设备的散热量,通过现场实测确定燃油设备尾气温度和排气速度,具体结果见表 2。

表 2 新城金矿井下燃油设备放热

Table 2 Heat release from underground fuel equipment at Xincheng Gold Mine

设备名称	额定功率/kW	散热功率/kW	散热量/(J·h ⁻¹)	尾气温度/°C	排气速度/(m·s ⁻¹)
3 m ³ 铲运机	150	86.25	3.11 × 10 ⁶	74.4	5.7
1 m ³ 铲运机	58	33.35	1.20 × 10 ⁶	61.4	5.2
20 t 卡车	240	138.00	4.97 × 10 ⁶	78.3	5.7
4 t 卡车	54	31.05	1.12 × 10 ⁶	58.3	5.1
多功能服务车	120	69.00	2.48 × 10 ⁶	68.5	5.3

3 网格划分及边界条件

3.1 几何模型及网格划分

根据新城金矿深部巷道截面积确定模型尺寸为

4 750 mm × 3 000 mm, 拱高为 1 200 mm, 巷道长度为 60 m。移动热源(井下矿车)尺寸为 4 300 mm × 1 800 mm × 1 700 mm, 热源初始位置距巷道入口 5 m。模拟巷道几何模型见图 3。

单位为米

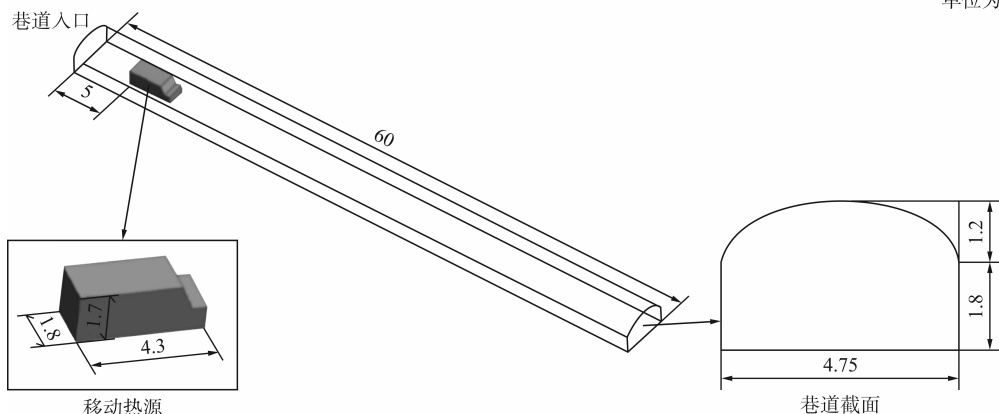


图3 模拟巷道几何模型

Fig.3 Geometric model of roadway

对巷道进行以六面体为主导的结构化网格划分, 由于热源形状不规则, 对其进行非结构化网格划分, 并且对热源、热源排气管部分进行加密和膨胀层设置, 最终确定网格数量为 810 000 左右。计算时使用动网格技术加 UDF 方法模拟热源匀速移动, 动网格更新方法采用光顺法和网格重构法, 光顺法可以使网格运动时减少变形, 网格重构法使运动中网格进行重新构造, 避免网格负体积产生。UDF 通过 C 语言编写程序, 可以控制热源匀速移动, UDF 可以在 Fluent 有限元软件中编译构建, 使其载荷。

3.2 模型控制方程

模型控制方程主要包括: 质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程。

1) 质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

式中: ρ 为气体密度 (kg/m^3); u_i 为速度矢量 (m/s)。

2) 动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_i} + F_j \quad (4)$$

式中: p 为压力 (Pa); T_{ij} 为黏性应变张量; F_i 为体积力 (N/m^3)。

3) 能量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho T}{\partial t} + \text{div}(\rho u T) = \text{div}\left(\frac{K}{C_p} \text{grad } T\right) + S_t \quad (5)$$

式中: T 为温度 (K); $\frac{K}{C_p}$ 为扩散系数; S_t 为能量源项。

3.3 数学模型边界条件

湍流模型选择 $k-\varepsilon$ 模型, 并开启能量方程。在

本次模拟中, 不考虑围岩放热情况, 模型巷道内空气流动为稳态紊流, 满足 Boussinesq 假设。

将入口边界条件风速设为 1.95 m/s , 风温 33.23°C 。热源尾气出口边界风速为 5.3 m/s , 尾气温 68.5°C , 热源以 1 m/s 速度匀速行驶, 热源功率为 $17.7 \text{ kW}/\text{m}^3$ 。将巷道壁面设置为厚度 0.1 m 的热对流交换壁面, 其材料为混凝土, 导热系数为 $1.28 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 比热容为 $970 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 热对流交换系数为 $4.74 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 出口设置为压力出口 (Pressure outlet)。采用 Coupled 求解器, 时间步长设置为 0.01 s , 时间步数为 2 000 步。

4 深部运输巷道热源散热模拟分析

4.1 热源顺风移动模拟分析

热源以 1 m/s 速度顺风移动 20 m 后在 xy 截面处的风温云图、风速云图和速度矢量图见图 4。由图 4-a) 可知: 移动热源在顺风移动 20 m 后, 由于热源尾气排放和热源本身散热, 对风温产生了影响。主要影响范围是热源前 15 m 处和热源后 0.3 m 处。热源产生的热量由风流带走, 尾气由风流吹向巷道的下盘, 上盘低温风流与下盘高温风流汇集后, 在车前 1 m 处形成了高温区域, 随着距离的增加, 移动热源对风温影响逐渐减小, 最终在移动热源前 15 m 处趋于稳定, 但由于热源不断释放尾气, 热源后 2 m 处持续产生高温区域。由图 4-b)、4-c) 可知: 热源尾部对风流经过产生了阻碍, 风流向巷道上盘和下盘扩散, 风流在经过排气管时, 风流与尾气汇集形成了涡流; 并且在热源上下两侧形成高风速区, 在热源前后两侧形成低风速区。

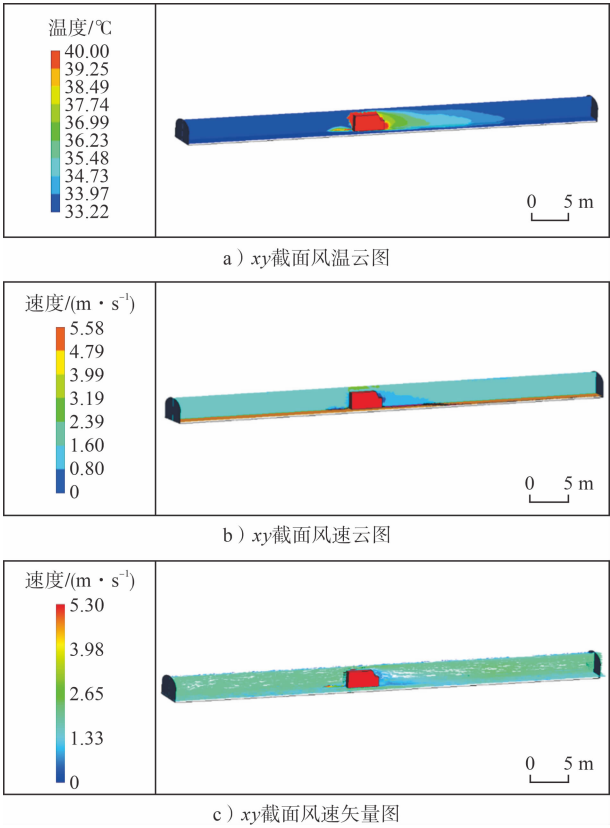


图4 xy截面风温云图、风速云图和速度矢量图
Fig. 4 Wind temperature cloud chart, wind speed cloud chart, and velocity vector chart of xy cross-section

热源以1 m/s速度顺风移动20 m后在zx截面处风温云图、风速云图和速度矢量图见图5。由图5-b)、5-c)可知:热源移动时对巷道内风流产生了阻塞。热源移动时其尾部对后方风流影响较大,风流经过热源排气管时,风流与尾气形成了涡流。风流流经热源尾部时由于机体的阻碍,风流开始向热源两侧扩散,当两侧的风流汇合后,在热源前端10 m范围内形成了“Y”形低速风流场。由图5-a)可知:风流在与尾气汇集后,在热源左侧形成了高风速区,高风速区风流将热源的热量带向热源左侧,使热源左侧形成高温区域。左侧高温风流在经过头部时与右侧风流汇合,汇合的风流温度最终在移动热源前15 m处趋于稳定,与xy截面相同,热源后2 m处持续产生高温。

4.2 热源逆风移动模拟分析

热源以1 m/s速度逆风移动20 m后在xy截面处风温云图、风速云图和速度矢量图见图6。由图6-b)、6-c)可知:由于是逆风移动,热源前端对风流产生了影响,热源尾部对风流影响较小。由于热源前端阻碍,风流在经过热源后向上下两侧扩散,使热源上下两侧产生高风速区,上下两侧风流与热源尾气汇集后在热源尾部形成了回流漩涡。由于尾气速度大,导致热源尾部形成了外部速度低、内部速度高的环状卷吸区。由图6-a)可知:热源在逆风移动20 m后,前

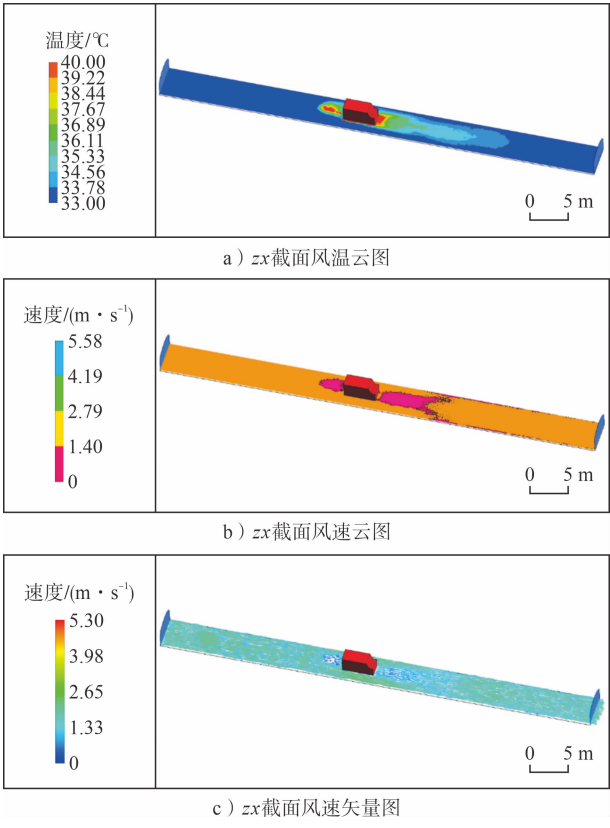


图5 zx截面风温云图、风速云图和速度矢量图
Fig. 5 Wind temperature cloud chart, wind speed cloud chart, and velocity vector chart of zx cross-section

端风温变化较小,热量主要集中在尾部。由于受到热源上下两侧风流的影响,热源散热和排气热量在热源后方形成高温区,随着距离的增加,风温逐渐降低,最终在热源后20 m趋于稳定。

热源以1 m/s速度逆风移动20 m后在zx截面处的风温云图、风速云图和速度矢量图见图7。由图7-b)、7-c)可知:风流在经过热源时,在热源左右两侧形成高风速区,在热源后方形成了“一”形的低风速区。由图7-a)可知:热源散热和排气散热的热量聚集在汽车的尾部,在汽车尾部形成了内部温度高、外部温度低的环状温度场。随着距离的增加,温度不断下降,最终在热源后方20 m处趋于稳定。

4.3 移动热源对巷道风温影响

移动热源对巷道风温影响变化见图8。由图8可知:热源顺风移动时,其风温最高点在距巷道口25 m处,为39.43 °C;在距巷道口45 m处风温趋于稳定,稳定时温度为33.75 °C。热源在逆风移动时,其风温最高点在距巷道口25 m处,为39.86 °C;在距巷道口5 m处,风温趋于稳定,稳定时温度为34.12 °C。通过对比可知,热源在逆风移动时由于风流与尾气的汇集导致其对风温影响范围比热源在顺风移动中大5 m,而且逆风移动中稳定的风温比顺风移动高。

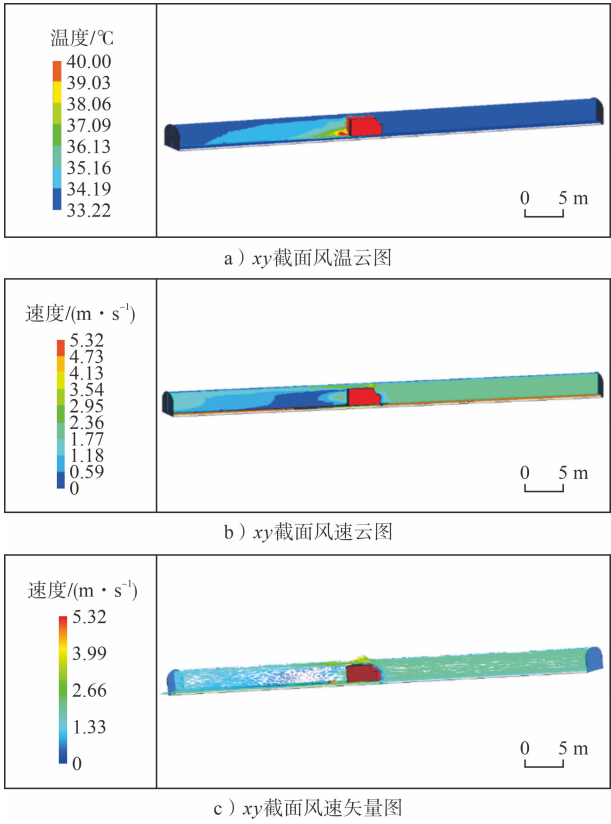


图6 xy截面风温云图、风速云图和速度矢量图
Fig. 6 Wind temperature cloud chart, wind speed cloud chart, and velocity vector chart of xy cross-section

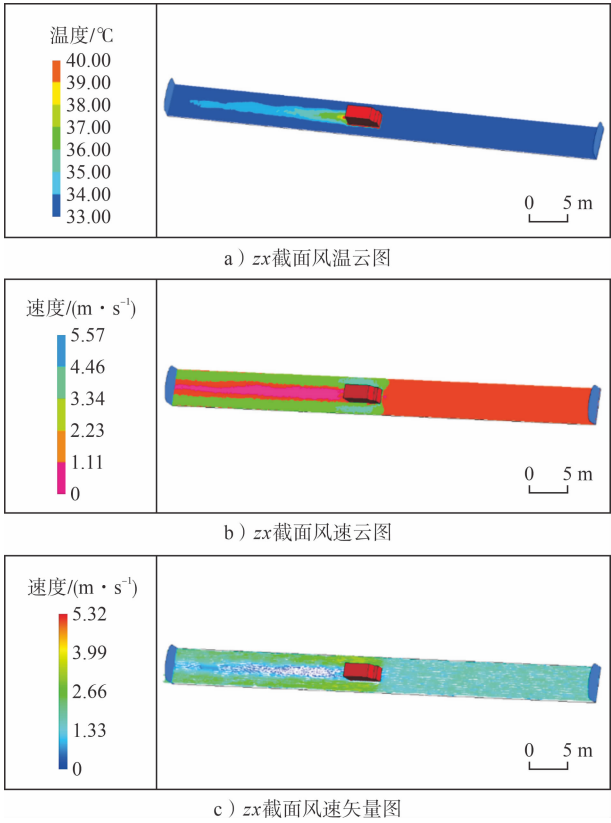


图7 zx截面风温云图、风速云图和速度矢量图
Fig. 7 Wind temperature cloud chart, wind speed cloud chart, and velocity vector chart of zx cross-section

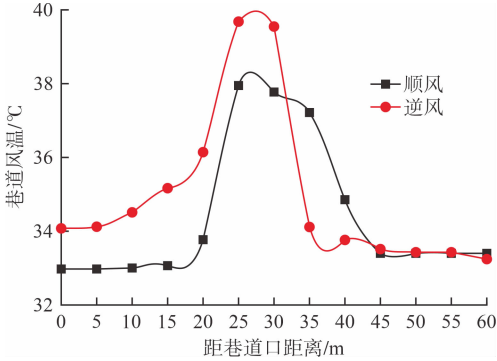


图8 移动热源对巷道风温影响变化图
Fig. 8 Changes in the influence of moving heat sources on wind temperature of roadway

5 结论

为了研究热源移动对深部巷道风流环境所产生的影响,本文通过 Fluent 有限元软件,模拟热源在不同情况下移动对深部巷道风流影响,结论如下:

1) 热源在顺风移动时,热源尾部会对风流产生阻碍,使热源前端风流紊乱;热源顺风移动对风温影响范围为热源前端 0 ~ 15 m 和热源尾部 0 ~ 2 m,并使热源附近持续产生高温,最高温度为 39.43 °C。

2) 热源在逆风移动时,热源前端会对风流产生阻碍,使热源尾部风流产生环状卷吸区;热源在逆风移动时对风温影响范围为热源尾部 0 ~ 20 m,与顺风时相同,热源附近会产生持续性高温,最高温度为 39.86 °C。

3) 热源逆风移动时对巷道风流影响范围大于热源顺风移动,热源顺风移动使巷道风温升高 0.52 °C,热源逆风移动使巷道风温升高 0.89 °C,热源逆风移动时风温比顺风移动升高 0.37 °C。

[参考文献]

[1] 王运敏,李刚,徐宇,等. 我国深部矿井热环境调控研究近 20 a 进展及展望[J]. 金属矿山,2023(3):1-13.

[2] 吴柯杉. 井下移动热源对采场局部风流温度影响规律研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学,2018.

[3] 李宗翔,刘宇,刘汉武,等. 有热源巷道风流温度分布非稳态模型及数值计算[J]. 中国安全生产科学技术,2018,14(2):93-98.

[4] 鹿广利,刘传印,孙鑫鑫,等. 移动热源对巷道热环境影响的动态模拟研究[J]. 煤炭技术,2022,41(2):157-161.

[5] 赵宏斌. 基于多热源影响机理的高温工作面智能降温技术研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2021.

[6] 张育玮,邹声华,李永存. 高温矿井热源对风流稳定性影响的分析[J]. 中国安全生产科学技术,2015,11(8):46-51.

[7] ARTEM S, ANDREY S, DMITRIY B. Unsteady coupled heat transfer in the air and surrounding rock mass for mine excavations with distributed heat sources[J]. Fluids,2023,8(2):67.

[8] CHRISTOPHE A, JOSEPH G, NICOLAS F. Underground ancient mine work ventilation modeling[J]. Journal of Archaeological Sci-

ence; Reports, 2021, 37: 102805.

[9] LIANG K,HAO X,AN W,et al. Study on cable fire spread and smoke temperature distribution in T-shaped utility tunnel[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2019, 14: 100433.

[10] 徐加超,夏志新,陈鹏,等. 中空环形激光热源建模及温度场有限元模拟[J]. 中国激光, 2021, 48(17): 31 – 40.

[11] 王琼. 移动热源问题的移动加权最小二乘无网格法[J]. 西安文理学院学报(自然科学版), 2021, 24(3): 1 – 6, 12.

[12] 刘支会. 二维移动热源问题热传导现象的数值模拟[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.

[13] 黄山果,吴超,邱冠豪,等. 深井采矿热贡献率计算方法研究与实践[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(1): 91 – 96.

[14] 屈永良,辛嵩,陈兴波,等. 矿井热源对局部通风系统的影响及其处理对策[J]. 煤矿安全, 2016, 47(1): 163 – 166.

Research on the impact of underground moving heat sources

on the wind flow environment of deep roadways

Guo Liangyin¹, Zhang Jianjun², Wang Yu²

(1. *Xincheng Gold Mine of Shandong Gold Mining Co., Ltd.*;
2. *School of Civil Engineering, Liaoning Technical University*)

Abstract: In order to explore the influence of moving heat sources in the deep roadway on the wind flow environment, with Xincheng Gold Mine as the engineering background, the wind temperature and wind speed monitoring of a transport roadway on a deep level was carried out, and the heat release of fuel equipment in the deep roadway of Xincheng Gold Mine was calculated by field investigation and theoretical formula. Based on Fluent finite element software, simulation of the dynamic response of moving heat source under different wind flow conditions, and the influence of moving heat source on deep roadway wind flow environment was analyzed. The results show that the average wind speed is 1.91 m/s and the average wind temperature is 33.38 °C in the monitoring section; when the heat source moves downwind, the wind temperature on both the front end and the tail end is affected. The wind temperature gradually decreases with the increase of distance and tends to be stable at 15 m at the front end of the heat source, and the stable wind temperature is 33.75 °C, high temperature is generated continuously within the 2 m range at the tail of heat sources; when the heat source moves against the wind, only the tail wind temperature is affected. The wind temperature gradually decreases within the 0 – 20 m range of the tail of the heat source and becomes stable at 20 m of the tail of the heat source. The stable wind temperature is 34.12 °C; the range of influence of heat source on wind flow when moving upwind is larger than that when moving downwind, and the wind temperature when moving upwind is 0.37 °C higher than that when moving downwind.

Keywords: deep roadway; mechanization; moving heat source; wind flow environment; numerical simulation